

小規模飛行試験にもとづくパラフォイルの飛行特性解析

著者	溝端 一秀, モハマド ハイリ
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2011
ページ	40-43
発行年	2012-07
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008783

小規模飛行試験にもとづくパラフォイルの飛行特性解析

著者	溝端 一秀, モハマド ハイリ
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2011
ページ	40-43
発行年	2012-07
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008783

1. はじめに

将来の再使用型宇宙輸送機や飛行試験機等の回収のために、また非常時の滑走路外への着陸方法として、パラシュートに代わるものとして「パラフォイル」の利用が期待されており、自律飛行可能なパラフォイル飛行システムの構築が待たれている。パラフォイル本体は「キャノピー」とも呼ばれ、円形パラシュートの発展形であり、空気取り入れ口(インテーク)を持つ布袋(セル)を横に並べ左右対称な平面形を構成する。インテークを進行方向に向け、空気流のせき止め圧(ラム圧)によってセルを膨らませて翼形状を保持する。また、キャノピーの左右後縁を下に曲げることによって横制御が可能である。これらのことから直進飛行性と横制御性を兼ね備えており、パラシュートに比べて定点回収に適している。

パラフォイルを用いた自律回収システムを実現するには、まずはその飛行特性(空力特性および操舵応答)を把握する必要がある。パラフォイルの運動特性はその拘束条件によって大きく異なる事が知られており、風洞試験や曳航試験のようにパラフォイルを固定した時の運動特性は、飛行中の運動特性とは異なる。そこで、パラフォイルを実際に飛行させながら運動特性を計測することが必要である。また、その飛行速度が比較的小さいことから、パラフォイルは風の影響を受けやすいため、風の影響をできるだけ排除した条件で飛行試験を実施することも肝要である。そこで本研究では、屋内において風の影響を排除した比較的小規模な飛行試験によってパラフォイルの飛行特性の概略を把握することを目的とする。

2. 手法および理論

本研究では、体育館においてパラフォイル飛行実験機を手投げおよび無線操縦により飛行させ、飛行の様子を 2 台のビデオカメラで撮影し、動画を解析することによって飛行経路を同定する。また、機体に搭載した慣性センサー(INS)およびエアデータセンサー(ADS)によって加速度・角速度・対気速度ベクトルを計測し、これを後解析することによって飛行特性を調べる。解析手法は以下の通りである。

2-1. 動画解析

動画解析は、飛行実験機の飛行を 2 台のビデオカメラで撮影し、その 2 つの動画から実験機の軌跡データを得るものである。これによって飛行中の各時刻における機体の位置(座標)が地面固定 3 次元座標系において推定される。これを時間微分することによって速度や加速度が推定される。

2-2. 機上計測に基づく飛行特性解析

機体の姿勢角(オイラー角;ヨー角 ψ 、ピッチ角 θ 、ロール角 ϕ)は、以下の微分方程式を解くことによって、機体固定座標系での角速度 p 、 q 、 r から推算できる:

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= p + \tan \theta (q \sin \phi + r \cos \phi) \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= \frac{q \sin \phi + r \cos \phi}{\cos \theta}\end{aligned}$$

また、空力係数は以下の式にもとづいて機体固定座標系での加速度・角速度から推算される:

$$\begin{aligned}
C_X &\equiv -C_A = \frac{ma_x}{\bar{q}S} & C_L &= -C_Z \cos \alpha + C_X \sin \alpha & C_l &= \frac{1}{\bar{q}Sb} [I_x \dot{p} - I_{xz} (pq + \dot{r}) + (I_z - I_y) qr] \\
C_Y &= \frac{ma_y}{\bar{q}S} & C_D &= -C_X \cos \alpha - C_Z \sin \alpha & C_m &= \frac{1}{\bar{q}Sc} [I_y \dot{q} + (I_x - I_z) pr + I_{xz} (p^2 - r^2)] \\
C_Z &\equiv -C_N = \frac{ma_z}{\bar{q}S} & & & C_n &= \frac{1}{\bar{q}Sb} [I_z \dot{r} - I_{xz} (\dot{p} - qr) + (I_y - I_x) pq]
\end{aligned}$$

すなわち、動圧 \bar{q} 、翼面積 S 、翼幅 b 、迎角 α 、機体固定座標系における加速度 a_x 、 a_y 、 a_z 、角速度 p 、 q 、 r 、慣性モーメント I_x 、 I_y 、 I_z 、および慣性乗積 I_{xz} を計測できれば飛行中の姿勢角や空力係数を推定できる。

3. 実験装置

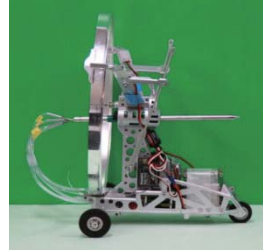
3-1. 機体とキャノピー

パラフォイル飛行実験機の機体本体には慣性センサーボード、エアデータセンサー、操舵信号ボード、ラジコン受信機、操舵用サーボモータ、バッテリー、およびレギュレータを搭載する。搭載物によって空力特性が変化しないようにカウリング(風防)を被せ、動画解析の目印としてカウリング先端近くに LED を装備している。これらの搭載物を含む全備質量は 550g である。

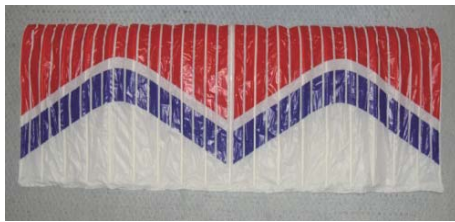
パラフォイル飛行実験機のキャノピーは、平面形状は翼幅 125cm、翼弦長 42cm の矩形であり、質量は約 80g である。動画解析の目印として両翼端に LED を装備している。キャノピーと機体をつなぐラインとしてサスペンションラインとコントロールラインがある。サスペンションラインはキャノピー前部の下面につながっており長さ 65cm である。また、コントロールラインはキャノピー後部下面につながっており長さ 61cm である。機体本体とキャノピーを併せた全備質量は 630g となる。



(a) カウリングを被せた実験機外観



(b) カウリングを外した実験機外観



(c) キャノピーの外観



(d) 動画解析用 LED

図1 小型パラフォイル飛行実験機

3-2. 慣性センサー(INS)

慣性センサーとして三軸加速度センサーと三軸角速度センサーを搭載しており、機体固定座標系での加速度・角速度を計測する。

3-3. エアデータセンサー(ADS)

5 孔ピトー管と圧力センサーボードで構成され、対気速度の大きさと方向(迎角、横滑り角)を計測できる。5 孔ピトー管の較正は、風洞試験によって迎角と各圧力孔の圧力の関係を調べることによっている。圧力センサーの較正は、精密な圧力生成器を用いて各センサーに規定の圧力を与え、センサーボードの AD 変換器出力値との対応関係を調べることによっている。



図2. 慣性センサーボード



図3. 5 孔ピトー管と圧力センサーボード

4. 解析結果と考察

機体固定座標系は、機体の重心から機軸前方向に x 軸、右方向に y 軸、腹方向に z 軸をとる。直線滑空の場合の加速度の履歴の一例を図4に示す。横軸は慣性センサーの電源を投入してから時間である。時刻 29.6~29.7sec において z 方向加速度の符号が反転しており、この時点が手投げ発射の瞬間である。その後滑空し時刻 33.5sec に床面に着地しており、着地衝撃の加速度が捉えられている。同じ直線滑空の場合の角速度の履歴を図5に示す。手投げ発射の際および着地の際の急激な姿勢変化が捉えられている。滑空中にはピッチングとヨーイングの大きな振動、およびローリングの小さな振動が捉えられており、これは滑空中の機体の振り子運動に対応する。

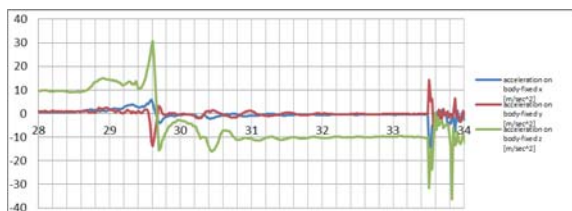


図4. 飛行試験で取得された加速度の履歴

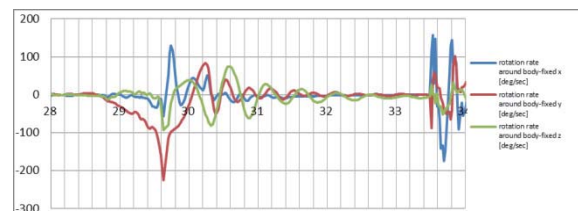


図5. 飛行試験で取得された角速度の履歴

次に、同じ直線滑空の場合の ADS による対気速度および迎角の推定値を図6に示す。5 孔ピトー管の較正式として上下または左右の圧力孔の差圧を動圧で除する計算式を用いているため、飛行していない時すなわち動圧がゼロに近い時の迎角推定は発散している。また、実験機を射出した直後の過渡運動の間は迎角が大きく変化している。時刻 30.8sec 以降は振り子運動を伴いながらも概ね定常飛行していることが分かる。

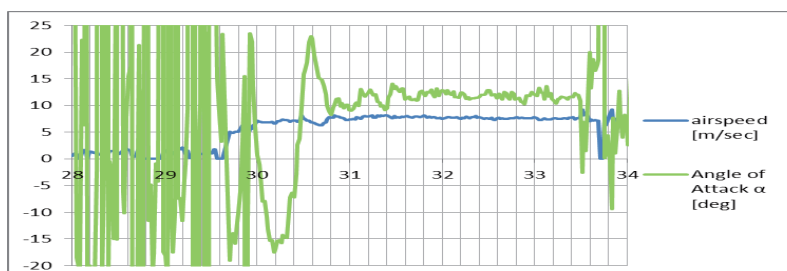


図6. ADS による対気速度および迎角の推定値

加速度計測値等から推算された軸力係数、横力係数、および垂直力係数の履歴を図7に、迎角との関係を図8に示す。さらに ADS によって計測された迎角を用いて揚力係数・抗力係数に換算した結果を図9に示す。ここで、揚力係数・抗力係数の推算においては、機体を射出した直後の非定常運動のデータは除外して、時刻 31～33.4sec の定常飛行のデータのみ使用している。この間、パラフォイル機体は振り子運動を伴いながら滑空しており、迎角 $-8 \sim +13$ 度の範囲で良好に空力係数を推定できている。

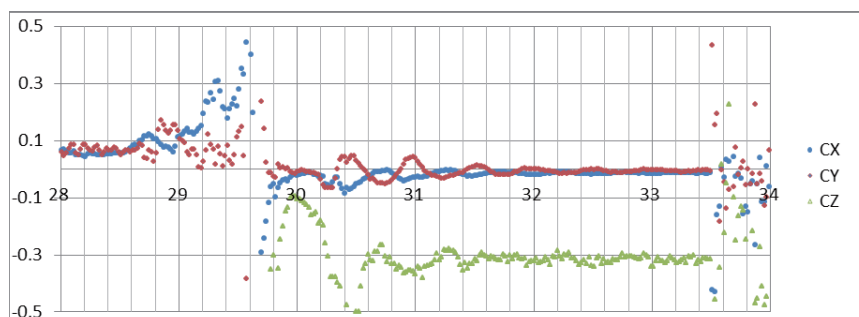


図7. 軸力係数、横力係数、垂直力係数の履歴

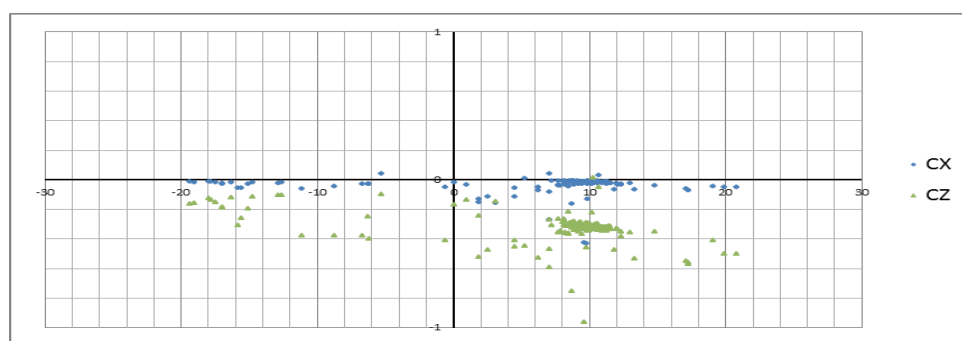


図8. 軸力係数、垂直力係数と迎角の関係

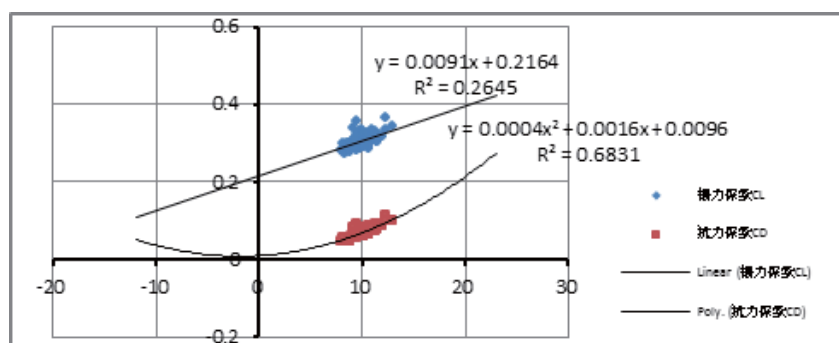


図9. 飛行試験から推定される揚力係数・抗力係数と迎角の関係

5. 結言

本研究は、屋内において風の影響を排除した比較的小規模な飛行実験によってパラフォイルの運動特性の概略を把握することを目的として、小型パラフォイル飛行実験機を製作した。慣性センサ、エアデータセンサ、および操舵信号記録器を搭載し、体育館における奥得ない飛行試験において加速度、角速度、対気速度ベクトル、操舵量、等を計測した。また、床面に設置した 2 台のビデオカメラで飛行の様子を動画撮影した。動画を解析することから飛行経路の概略を把握するとともに、オンボード計測データを解析することによって飛行中の座標や姿勢角の履歴、および空力係数を推定した。